

尚东瀚域雅苑陶粒混凝土泵送技术分析及其研究

吴险峰 邓志峰 吴少平

(中天七建, 广东 广州 510410)

摘要: 尚东瀚域雅苑项目在首层肉菜市场中应用陶粒混凝土泵送施工技术, 通过采用二步法施工、有效控制了混凝土的离析率和混凝土泵送过程容易堵管的问题, 达到了提高施工效率的效果。

关键词: 陶粒混凝土、混凝土泵送、二步法施工、离析率

1、工程概况:

尚东瀚域雅苑的首层地面采用建筑做法采用轻质混凝土回填其建筑做法为400mm厚C15陶粒混凝土, 首层建筑面积约为1307.5m², 轻骨料混凝土浇筑量为523m³。针对以上部位的轻骨料混凝土施工, 结合工期进度, 按常规做法多采用料斗浇捣的方法, 施工进度不能满足要求, 且占用塔吊时间, 影响其他施工作业。因此决定采用泵送技术进行施工, 以确保施工进度。

2、研究过程:

过程主要针对陶粒混凝土容易分层离析、难以泵送两大难题进行了研究分析, 综合国内外陶粒混凝土相关研究资料, 提出了自己的研究思路, 分别从原材料、配合比、生产控制、运输控制、施工要求等方面进行分析研究, 最终解决陶粒混凝土的两大难题。

七建与混凝土公司广东基础新世纪混凝土有限公司共同研究, 为满足轻骨料泵送要求, 我们主要从骨料级配调整、增加胶凝材料、提高混凝土拌合物粘性、减少用水量等方面进行配合比设计与确定, 由于轻骨料混凝土其中的骨料比重远远小于其胶凝材料的比重, 所以增加其黏聚性是防止其在运输及泵送过程中产生骨料上浮或分层离析的有效举措。另外, 轻骨料混凝土坍塌较普通混凝土快的多, 除配合比设计采用缓凝型外加剂外, 应尽量减少运输距离, 使生产到浇筑整个过程控制在最短时间内。

3、陶粒混凝土的理论研究

3.1陶粒混凝土分层原理

在普通混凝土中, 石子和砂的密度相近, 是所有组成中颗粒密度较大的组分。在拌和的过程中, 粗集料与颗粒较大的细集料下沉, 结果造成各组成

材料在整体上的分布不均匀, 最终形成普通混凝土的外分层结构。在陶粒混凝土中, 陶粒的颗粒密度较小, 所以在拌和过程中密度较小的陶粒上浮, 而水泥浆体和砂下沉, 结果形成与普通混凝土不同的外分层结构。

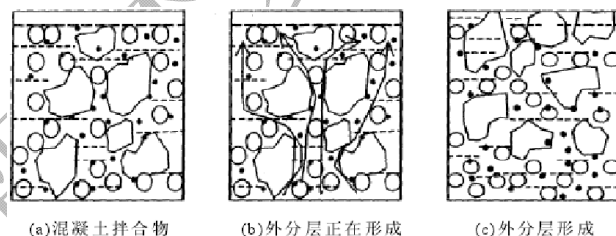


图 1 拌合物外分层的形成过程

由图1可见, 外分层作用使得陶粒主要集中在混凝土的中上层, 处于缺乏水泥石保护的环境中。这种分层作用导致陶粒混凝土在宏观上的不均匀。由于陶粒

自身的强度比较低, 在混凝土受压时, 处于混凝土表面的陶粒由于缺乏水泥石的支撑和保护, 而特别容易遭到破坏。因此, 减少拌合物的分层现象, 改善拌合物的匀质性, 使拌合物具有较高的稳定性, 不分层离析是配制高性能陶粒混凝土的必要条件。

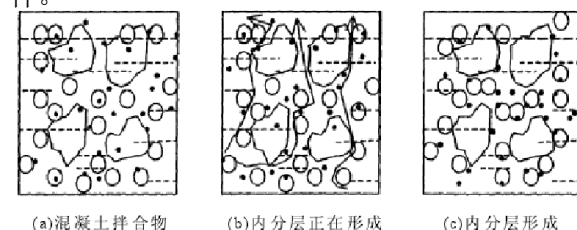


图 2 拌合物内分层的形成过程

外分层结构形成的同时, 在混凝土中也形成了内分层结构, 形成过程如图2所示。内分层的形成主要是由于水在向上移动的过程中遇到较大的物

质，如集料、钢筋而聚集在这些物质下部，内分层作用将造成混凝土结构在细观上的不均匀。(a)混凝土拌合物 (b)内分层正在形成 (c)内分层形成图2内分层结构的形成过程综上所述，内外分层作用使混凝土在宏观和微观上变得不均匀，从而降低了混凝土的强度、抗渗性、抗化学侵蚀、抗冻性等一系列性能。从内、外分层结构的形成过程可知，改善内、外分层作用的影响，主要是减小外分层作用造成的混凝土宏观分布不均匀性，这是提高轻集料混凝土力学性能和耐久性的关键。因此，通过理论分析进一步研究陶粒混凝土产生分层离析的原因及改善措施。

陶粒混凝土的离析是由于构成混凝土的各种固体粒子大小、密度不同而引起各组分分离，进而造成混凝土的不均匀现象。导致颗粒在混凝土中分离的直接原因是它们之间发生相对运动而产生不同的位移。

3.2 泵送陶粒混凝土拌合物的工作性能评价指标

陶粒混凝土拌合物过程中采用以下2种指标，来评价陶粒混凝土拌合物的工作性能。

3.2.1 坍落度和扩展度

坍落度和扩展度是评价混凝土拌合物流动性、保水性和粘聚性的重要指标。该方法既简单又实用，又方便现场操作，因此得到广泛的应用。由于二者都有其各自的优缺点，对于大流动性的轻集料混凝土而言，可采用坍落度和扩展度相结合的方法衡量混凝土拌合物的流动性及稠度。坍落度和扩展度试验按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080—2002)进行。

3.2.2 离析率

由于陶粒上浮作用，使得上层拌合物中陶粒较多，而下层拌合物中陶粒含量相对较少。基于此现象，可以用振捣后上下层拌合物中陶粒质量的差异来表示陶粒在振捣过程中的运动情况。因此，我们采用了离析率来表示，离析率试验是测量经过一定时间振动后，用离析率试模内上、下层拌合物中粗骨料含量的差异，来表示拌合物的抗分层、抗离析性能。

本试验采用离析率试验仪器为自行加工的，直径为 250mm，上、下层相互连通，高度都是 150mm 的钢筒，如图3所示。试验时，先将混凝土拌合物装入钢模，经插捣后，刮平，擦干钢模表面，称取钢模和混凝土总重，然后在钢模底部放入一根

直径为20mm的铁棒，左右各振100次，完成后，分别取出上、下层拌合物，测出上下层各自混凝土的质量，然后再装入筛孔尺寸为 4.75mm 的钢筛，用水冲刷干净水泥砂浆，挑出拌合物中的陶粒，烘干



后分别测量上下层拌合物中陶粒的质量。

图3 离析率试验钢模

离析率可以采用拌合物离析率和陶粒离析率来表示，拌合物离析率为上下两层的质量之比，陶粒离析率为上下两层陶粒的质量之比。计算式为：

$$\text{拌合物离析率} = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100\% \quad (2.5)$$

$$\text{陶粒离析率} = \frac{m_{10} - m_{20}}{m_{10} + m_{20}} \times 100\% \quad (2.6)$$

式中：m为钢模内拌合物总质量；

m1、m2分别为钢模内上下两层拌合物振捣后的质量；

m10、m20分别为钢模内上下两层拌合物内陶粒的质量。

离析率越低，表示拌合物的匀质性越好，拌合物的抗分层、抗离析性能越好。

4、原材料的选择及性能试验

混凝土需要实际施工应用，所以选择的原材料因结合实际生产，才能达到更好的应用效果。

4.1 水泥的选用及性能

水泥的选用除了满足规范要求外，还应尽量选用标准稠度用水量较低、性能稳定的品种，因此，经过对比试验，清远市英德海螺有限公司生产的P.O42.5R普通硅酸盐水泥性能较优，主要性能指标见表1：

细度 (80 μm筛) 筛余 (%)	标准稠度用水量 (%)	凝结时间 (h:min)		抗压强度 (MPa)		抗折强度 (MPa)		安定性
		初凝	终凝	3d	28d	3d	28d	
1.0	26.4	2:05	3:00	31.2	50.3	5.7	9.2	合格

表1 性能指标表

4.2 煤灰的选用及性能

优质粉煤灰在混凝土中具有活性效应、形态效应、以及微集料效应三大效应，有助于改善水泥石的水化产物组成，提高水泥石均匀性和致密性。特别是在混凝土泵送过程中能起到润滑管壁、增强陶粒混凝土的流动性，提高可泵性。我们根据样品试配对比，黄埔电厂的煤灰品质较优，其主要性能指标见表2。

厂家	品质	细度	烧失量	需水量比	S03含量	玻璃体情况
黄埔电厂	II	18%	3.2%	97%	0.22%	多

表2 煤灰的性能指标

4.3 外加剂选用及性能

陶粒在混凝土中容易吸收浆体中的水分，导致混凝土坍落度损失大或是泵送中干涩，所以陶粒混凝土对外加剂的要求也较高，特别是在浆体的保水性及混凝土的坍落度保持反面，应有较好的效果。我们通过对西卡3320C、四航和强达QD等多家聚羧酸高性能减水剂进行对比试验研究，得强达QC高性能聚羧酸减水剂效果最好，性能优越，因此本试验选用强达QC，其物理性能见表3。

固含量 (%)	密度 (g/cm ²)	减水率 (%)	净浆流动度 (%)	含气量 (%)
21	0.95	32	250	1.8

表3 外加剂的物理性能

4.4 细骨料选用及性能

陶粒混凝土应尽量选用颗粒级配为II区的中砂,且含泥量不大于2%，泥块含量不大于1%，另外砂中大于10mm颗粒含量应不大于5%，因为当砂中大于10mm颗粒含量过高，会导致配制出的混凝土容重较大，不易满足设计的混凝土容重要求，所以，在条件允许情况下，应尽可能避免使用此类砂。本次试验选用西江河砂的物理性能见表4。

表观密度 (kg/m ³)	堆积密度 (kg/m ³)	细度模数	含泥量 (%)	Cl ⁻ 含量	级配
2610	1440	2.5	0.3	0.004	II区

表4 砂的物理性能

4.5 水的选用

陶粒混凝土拌和用水应符合国家现行标准《混凝土拌和用水标准》(JGJ 63)的要求。本工程使用饮用自来水。

4.6 陶粒的选用及性能

陶粒是在一定的生产工艺以及1000℃左右高温作用下，粘土类矿物因排出气体，产生膨胀而形成的内部具有灰黑色蜂窝状结构，表面包裹一层下班化外的壳的一种坚硬、轻质圆形或椭圆形颗粒，具体如图4所示。其表面具有大量的沟纹和凹槽，因而与水泥砂浆之间能产生非常好的结和性。但同时，这也使得陶粒具有吸水性、密度不一的特点，与陶粒的最大粒径及级配一样，都会对陶粒混凝土性能产生较大影响。



图4 陶粒

由前面的分析可知，陶粒在混凝土中的运动速度 v 与陶粒粒径 r 的平方成正比，因此陶粒的粒径对陶粒混凝土的分层现象影响很大，本试验分别采用最大粒径为1.5mm、20mm、16mm的陶粒配制陶粒混凝土，试验结果见表5。从表中可以看出，陶粒最大粒径的增大，加剧了拌合物的分层现象，陶粒混凝土的拌合物离析率和陶粒离析率都显著增大，这是由于陶粒粒径的增大，加快了陶粒的上浮速度，使陶粒的匀质性明显降低。从表5中还可以看出，硬化混凝土的抗压强度随陶粒最大粒径的增大而有所降低，这是由于陶粒的颗粒强度随粒径的增大而降低，因而同等条件下用其配制出的混凝土的强度就会降低。因此，为了减少陶粒混凝土的上浮现象

和保证硬化后混凝土的强度，陶粒混凝土应严格控制陶粒的最大粒径，对于泵送陶粒混凝土而言，陶粒的最大粒径应选择16mm为宜。

混凝土配合比 (Kg/m ³)						试验结果						
水泥	煤灰	砂	陶粒	水	外加剂	和易性	坍落度	扩展度	1h后坍落度	拌合物离析率	陶粒离析率	28d强度
0			420/16mm			好	110	310	80	18.1	22.8	28.9
440	0	810	420/20mm	220	0	较好	100	300	60	26.4	32.1	25.4
0			420/31.5mm			较好	100	295	60	40.2	45.6	22.6

表5 陶粒粒径对陶粒混凝土的影响实验

陶粒作为混凝土中的粗骨料，其级配混凝土性能也有很大的影响，首先陶粒的级配越好，空隙越小，在保证混凝土流动性的前提下所需的水泥浆的体积就越小。其次陶粒级配较好时，可以增大陶粒的上浮阻力。在混凝土中较小粒径的陶粒，所受到得浮力较小，不足以克服水泥浆体的粘滞力，因而能在水泥浆体中保持稳定而不上浮；另一方面，这些稳定的粒径较小的陶粒堵塞了大颗粒的运动通道，使大颗粒难以向上运动。因此，选择良好的颗粒级配对减小陶粒的上浮也具有重要作用。为了验证级配对混凝土的影响，我们做了对比试验，结果见表6。

混凝土配合比 (Kg/m ³)						试验结果						
水泥	煤灰	砂	陶粒	水	外加剂	和易性	坍落度	扩展度	1h后坍落度	拌合物离析率	陶粒离析率	28d强度
0			420/连续			好	120	320	90	18.3	22.8	28.9
440	0	810	420/单一	220	0	一般	100	310	70	24.8	29.1	26.4

表6 陶粒级配对混凝土性能的影响

通过试验对比，在拌合物离析率、陶粒离析率及强度方面，使用5-16mm连续级配的混凝土性能明显优于使用16mm单一级配的的陶粒混凝土。所以陶粒的级配应选择5-16mm连续级配。

陶粒的内部结构为蜂窝状，导致其吸水特性较强，所以在拌制混凝土时，会吸收其中的水分，从而引起混凝土坍落度小或损失大的现象。由于材质及工艺等因素，不同陶粒的吸水率是不同的，不同预吸水程度的陶粒所配制的陶粒混凝土性能也不同。因此在配制陶粒混凝土之前应首先了解陶粒的吸水特性，本次试验用陶粒的吸水率随时间的变化规律，如图6所示。从图中可以看出，24h后陶粒的吸水率比1h时吸水率增加了58%，之后增加缓慢。因此在常压下采用浸泡法预湿陶粒时，预湿时间宜为24h。

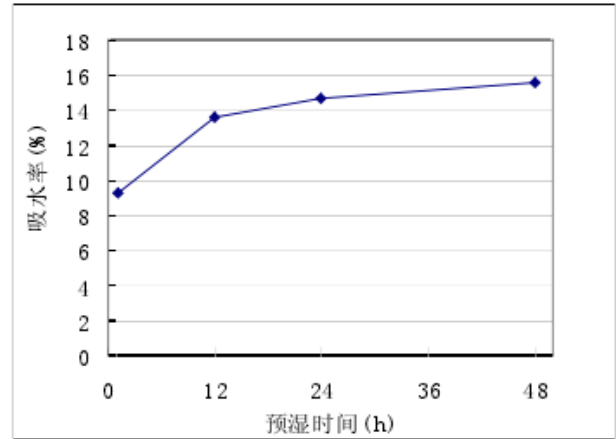


图6 陶粒的吸水率随预湿时间的变化

本试验研究了陶粒未预湿、预湿 1h、24h 后拌制的混凝土的坍落度、扩展度、离析率的差异，以这些指标来衡量陶粒的预吸水时间对陶粒性能的影响，从而提出该陶粒配制陶粒混凝土的合理预吸水程度，试验结果见表7。从表中可以看出，随着预吸水时间增大，混凝土的流动性有所增大。因为预湿处理后的陶粒，在拌合过程中吸水量减少，能达到表面润滑的作用，流动性比不预湿的要好。

混凝土配合比 (Kg/m ³)						试验结果						
水泥	煤灰	砂	陶粒	水	外加剂	和易性	坍落度	扩展度	1h后坍落度	拌合物离析率	陶粒离析率	28d强度
0			420/预湿0			差	90	290	70	24.3	26.1	27.6
440	0	810	420/预湿1	220	0	较好	110	320	85	18.2	19.6	28.9
0			420/预湿24h			好	130	330	100	17.6	18.8	30.3

表7 陶粒的预吸水时间对混凝土性能的影响

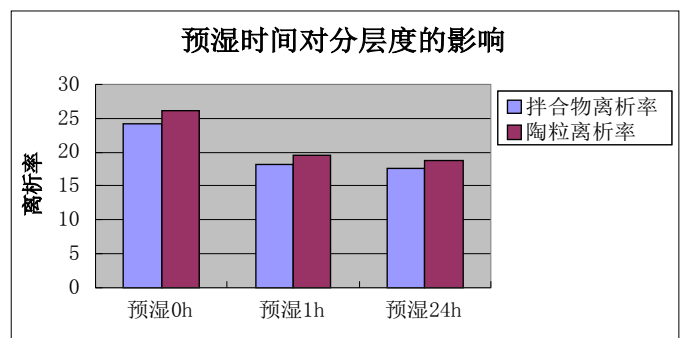


图7 陶粒预湿时间对混凝土性能的影响

由图7可以看出，预湿后陶粒混凝土的拌合物离析率和陶粒离析率，与未预湿相比显著降低，但1h时和24h后增幅不是很大。预湿处理减小了陶粒与水泥浆体之间的密度差，一定程度上减轻了陶粒的上浮作用。由表7还可以看出，陶粒预吸水后其硬化混凝土28天抗压强度有所提高，其中预湿24h

的抗压强度与未预湿相比增幅达到了9.8%。这是由于陶粒具有“自养护”作用，陶粒经过预吸水后，储存在陶粒内部的水分在水泥水化过程中逐渐释放出来，由内到外对陶粒周围的水泥石进行养护，优化了陶粒和水泥石界面结构，从而使硬化后的混凝土强度也有所提高。由此可见，陶粒预湿24h可实现较好的流动性与抗分层离析性能，同时也混凝土的强度也有所提高。

结合以上试验，初步确定了泵送陶粒混凝土对陶粒的性能的要求，及使用前的处理方法，经检测筛选，选择使用广州华穗陶粒制品有限公司生产的页岩陶粒，其主要性能指标检测见表8：

颗粒级配 (mm)	级配	表观密度 (kg/m ³)	堆积密度 (kg/m ³)	1h吸水 率(%)	筒压强度 (MPa)
5-16	连续 级配	1260	690	9	3.8

表8 陶粒的性能指标

5、泵送陶粒混凝土的配合比试验研究

轻集料混凝土的配合比设计方法有两种：松散体积法和绝对体积法。相比之下，松散体积法的设计过程更为简便，应用也较普遍。在我国，实际工程中多用松散体积法进行轻集料混凝土的设计。

本试验主要是针对尚东翰御雅苑首层及屋面工程设计，其设计强度等级为LC25。本试验根据《轻集料混凝土技术规程》(JGJ51—2002)中松散体积法进行配合比设计，基准配合比为JZ，陶粒采用5~16mm连续级配，试验前预湿24h。

5.1 粉煤灰掺量的确定

之前我们已经通过试验对比选择了优质的粉煤灰，现通过等量取代法掺入混凝土中，具体试验配比及效果见表9：

混凝土配合比 (Kg/m ³)						试验结果						
水泥	煤灰	砂	陶粒	水	外加剂	和易性	坍落度	扩展度	1h后坍落度	拌合物离析率	陶粒离析率	28d强度
440	0		420			较好	120	300	80	18.1	22.8	28.8
410	30		420			好	130	310	90	20.8	21.8	28.1
395	45	810	420	220	0	好	140	340	110	21.2	22.1	27.9
380	60		420			一般	145	360	110	28.6	32.6	25.2
365	75		420			一般	150	380	120	42.3	45.9	24.3

表 9 粉煤灰掺量确定试配

从表9的试验结果可以看出，随着粉煤灰用量的增加，陶粒混凝土的坍落度、扩展度都有显著增大，但和易性却先变好后变差，主要是由于煤灰用量增加，使得水泥浆体粘性下降，导致了拌合物离

析率及陶粒离析率变大，陶粒容易上浮，出现分层，所以粉煤灰掺量选择10%，即45Kg/m³为宜。

5.2 外加剂掺量确定

泵送陶粒混凝土的坍落度试配时要求的坍落度值应满足下式计算：

$$T_t = T_p + \Delta T \quad (5.1)$$

式中 T_t 为试配时要求的坍落度值 (mm)；

T_p 为入泵时要求的坍落度值 (mm)；

ΔT 为试验时测得在预计时间内的坍落度经时损失值 (mm)。

根据工程实际情况，工程结构为保温结构，考虑泵后的施工效果， T_p 选择160mm以上为宜，而运输时间约为0.5h，加上施工准备及施工停顿时间0.5h，所以应测1h后坍落度损失。

外加剂具有减水效果，可以减少水用来，降低水灰比，提高陶粒混凝土的密实度，促进强度提高；同时也具有改善混凝土和易性功能，特别是在保坍性能方面，具有良好效果。具体试验及结果见表10：

混凝土配合比 (Kg/m ³)						试验结果						
水泥	煤灰	砂	陶粒	水	外加剂	和易性	坍落度	扩展度	1h后坍落度	拌合物离析率	陶粒离析率	28d强度
				220	0	较好	140	340	90	21.3	22.3	28.8
				198	2.6	较好	180	390	130	14.4	15.2	24.5
				192	3.1	好	190	410	140	14.8	15.9	26.2
395	45	810	420	188	3.3	好	200	430	160	15.3	16.2	28.6
				182	3.5	好	210	450	175	15.6	16.6	32.4
				176	3.7	一般	220	480	180	19.9	22.1	34.1
				170	3.9	较差	220	510	185	24.6	26.8	34.6

表10 外加剂掺量对泵送陶粒混凝土的影响

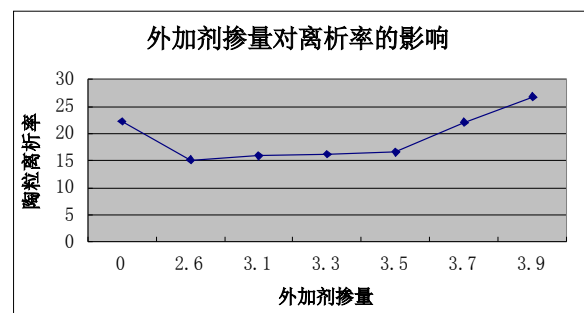


图8 外加剂掺量对离析率的影响

从试验结果看出，掺入外加剂并相应减少用水量后，陶粒混凝土的和易性得到明显改善，坍落度和扩展度随着外加剂掺量的增加而增大，同时坍落度损失也越来越小，由于水灰比的降低，浆体浓度增大，拌合物离析率及陶粒离析率也随之降低；图7显示当掺量超过0.8%后，陶粒混凝土和易性变差，离析率迅速增大。所以结合坍落度损失情况及陶粒离析率的变化，外加剂用量选择3.5Kg/m³最优。

5.3 胶材总量的确定

配合比经外加剂优化后，陶粒混凝土的强度及

坍落度等要求已能满足设计要求，但陶粒离析率仍然偏高，为提高陶粒混凝土的可泵性，降低离析率，按照之前的分析，可通过调节水泥浆体与陶粒的密度差及水泥浆体的粘性来调节，因此，在确定了煤灰与水泥的比例及水胶比后，只能通过调节胶材总量达到调整密度差及浆体粘性的要求。调整试配及结果见表11：

混凝土配合比 (kg/m ³)						试验结果						
水泥	煤灰	砂	陶粒	水	外加剂	和易性	坍落度	扩展度	1h后坍落度	拌合物离析率	陶粒离析率	28d强度
383	43			177	3.5	较好	190	390	155	18.6	21.3	30.8
395	45	810	420	182	3.5	好	210	450	175	15.6	16.6	32.4
408	47			187	3.6	好	220	500	180	12.6	12.9	33.3
421	49			192	3.8	好	220	520	180	12.2	12.6	33.9

表 11 胶材总量试配及结果

结果表明，在保持水灰比不变的情况下，胶材用量降低，则陶粒离析率升高，胶材用量增加，陶粒离析率先下降，然后平缓，说明陶粒离析率随着胶材用量的增加，陶粒离析率先降低后趋于平缓，这是由于胶材用量增加后，水泥浆体粘性增强，但同时也增大了水泥浆体与陶粒的密度差，所以二者存在一个平衡关系。因此，胶材用量选择455Kg即可。

综上所述，通过有针对性的原材料筛选，选用松散体积法并结合相关规范及实际应用，初步拟定了配比之后，进行了大量试配，根据坍落度、1h损失、拌合物离析率、陶粒离析率等指标，最终确定了最优配合比，具体见表12：

胶材		中砂 (kg/m ³)	陶粒 (kg/m ³)	外加剂 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	体积 砂率%	水灰比	容重 (kg/m ³)
水泥 (kg/m ³)	粉煤灰 (kg/m ³)							
408	47	810	420	3.6	187	50	0.41	1872

表12 LC25泵送陶粒混凝土最佳配合比

5.4 运输及泵送施工模拟试验

LC25泵送陶粒混凝土最佳配合比试验室研究成功后，为了确保该配合比能够很好应用于实践当中，我司与施工单位共同合，针对陶粒混凝土的运输及泵送过程进行了模拟试验，试验分两步完成，一是运输过程对泵送陶粒混凝土的和易性的影响，二是运输到目的地后的泵送试验。

1) 运输过程对泵送陶粒混凝土的和易性的影响

根据试配结果，先做好陶粒预湿等工作，按照最佳配合比进行生产，共生产了6m³，经过35min，

到达工地，取样并检测，整个过程约1h，出场与到工地检验结果，见表13。

	和易性	坍落度	扩展度	拌合物 离析率	陶粒离 析率
出场	好	220	510	12.5	12.7
到工地	好	185	460	18.6	19.9

表13 出场与到工地检验结果

经搅拌车装料到工地实际试验，出场检验时与实验室试配结果一致，但经搅拌车运输到工地后，坍落度损失与试验一致，但陶粒离析率方面与试配结果相差较大，如此就会影响陶粒混凝土的泵送及施工效果。经大家研究分析，这是由于陶粒混凝土在运输过程中，车辆的不停颠簸，相当于陶粒混凝土不停处于缓慢振捣状态，导致陶粒逐渐上浮，当陶粒混凝土还出流体状态，陶粒分层就一致持续，最终导致了到工地后陶粒离析率与试配结果不一致。

然而，原材料的选择及配合比的设计都是经过优选的，通过这两方面改善陶粒离析率的空间较小，因此，我们必须在生产或是运输供应上改进，才能更符合实际。而陶粒混凝土中陶粒上浮、砂下沉是不可避免的，因此，为使得陶粒混凝土到达工地时，陶粒离析率满足施工要求，有两个途径：一是之前我们通过原材料选择及配合比设计方面延缓了陶粒上升的速率，二是延长陶粒上浮或是砂下沉的距离，使之在一定时间内陶粒离析率满足施工要求。

假设在搅拌车装完混凝土后，再在表层铺一层砂浆，这样在运输过程中，砂浆就会逐渐下沉，与底下的陶粒混凝土互相混合，而后达到混合均匀。若能在两者混合均匀前到达工地，则可以达到控制陶粒离析率的目标。虽然，在加砂浆的同时，仍须保证混合后的陶粒混凝土与基准配合比一致，所以生产时，必须把基准配合比分成两部分，即可化为公式5.2：

$$\text{基准配合比} = \text{调整后的陶粒混凝土配合比} + \text{换算砂浆配合比} \quad (5.2)$$

具体操作如下：

搅拌车装11m³混凝土，则生产流程为10m³调整后的陶粒混凝土+1m³砂浆，调整后的陶粒混凝土配合比及砂浆配合比见表14：

配合比	水泥	煤灰	砂	陶粒	水	外加剂	方量/车
陶粒砼配合比	380	40	710	420	170	3.3	10
砂浆	280	70	1000	0	170	3	1

表 14 计算调整后的陶粒及砂浆配合比

为验证此法的可行性，我们先进行了试配及相关试验，相关数据见表15：

编号	混凝土配合比 (Kg/m ³)							试验结果						
	水泥	煤灰	砂	陶粒	水	外加剂	和易性	坍落度	扩展度	1h后坍落度	拌合物离析率	陶粒离析率	28d强度	
A	408	47	810	420	187	3.6	好	220	500	185	12.5	12.9	33.4	
B	380	40	710	420	170	3.3	较好	180	440	150	14.6	16.8	/	
C	B+砂浆							/	/	/	/	7.6	7.9	/

表 15 调整前后陶粒混凝土性能对比

表16验证结果显示，程序调整后的陶粒离析率远小于调整前，说明这个方法确实可行。因此，我们再次进行了生产试验，并运送到工地，在运输过程中，搅拌车滚筒采用低速搅拌，抽样检测，结果见表16：

	和易性	坍落度	扩展度	拌合物离析率	陶粒离析率
到工地	好	180	460	7.8	8.6

表 16 生产程序调整后的陶粒混凝土性能

经调整后，混凝土到达工地后，混凝土的和易性及陶粒离析率与试配结果一致，说明我们的假设理论正确，调整措施确实有效，并且满足生产需要，解决了泵送陶粒混凝土因为运输过程导致性能变差的难题，从而保证了泵送陶粒混凝土的可泵性。



图9 塌落度试验

2) 运输到工地后的泵送试验

按上述流程，陶粒混凝土运输到工地后，泵车接管及润管等准备工作完成后，搅拌车先高速搅拌2min，把陶粒混凝土及砂浆搅拌均匀，而后才开始卸料，经过12min后，10方陶粒混凝土泵送完成。

泵送后的混凝土坍落度经检查为155mm，和易性好，便于施工。

6 生产过程重点控制

6.1 生产控制

生产中，每车装11方，并且严格按照“生产二步法”进行，即先装10方调整后的陶粒混凝土，而后在装一方砂浆。并且生产前都须进行配方符合，检查无误之后，方可生产。

6.2、运输控制

搅拌车装好混凝土后，必须控制搅拌车鼓的转动速度，采用低速搅拌，保证运输过程中，砂浆与陶粒混凝土进行缓慢混合搅拌，延长搅拌时间，确保搅拌均匀前到达工地

7 施工过程控制

7.1 严格控制混凝土质量

泵送陶粒混凝土拌合物经搅拌车运至施工现场后，在泵送前，必须先高速搅拌2min，待搅拌均匀后，对每一搅拌车混凝土拌合物进行坍落度、和易性等性能检测，坍落度严格控制在180±20mm的范围内，和易性要好，不能泌水不能离析，陶粒离析率不能超过12%，超出此范围严格做退料处理。

7.2 泵送陶粒混凝土的浇筑

泵送陶粒混凝土拌合物运至浇筑地点检测合格后，应立即浇筑入模。浇筑陶粒混凝土所需的捣实工作量，比普通混凝土大，因为陶粒的密度较低，因而施加给混凝土下层的附加荷载较小，荷载在混凝土内部衰减较大。另外，从陶粒混凝土中排出空气的速度比普通混凝土要慢。陶粒混凝土拌合物应垂直下落到浇筑地点，尽量避免在模板内再次移动使混凝土产生离析。另外，浇筑时混凝土拌合物不可直接落到钢筋和其他预埋件上以免产生离析。

7.3 泵送陶粒混凝土的振捣

陶粒混凝土振捣应遵循“振捣间距短，振捣时间短”的原则。由于陶粒为多孔结构，振动能量在陶粒混凝土拌合物中的衰减速度要慢于普通混凝土。因此，为了保证混凝土振捣密实，应缩短振捣间距。普通混凝土拌合物的振点间距一般为振动棒作用半径的1.5倍，而陶粒混凝土的振点间距应缩短至振动作用半径的1倍。由于陶粒的密度小于砂浆，陶粒混凝土在振动成型时无法看到普通混凝土达到振动密实时出现的如砂浆泛起、停止下沉等现象，操作人员以往的经验不再适用。振捣延续时间以拌合物捣实为准，振捣时间不宜过长，以防陶粒

上浮。但是由于陶粒混凝土的容重小，排除气泡的速度比普通混凝土慢，所以振捣必须充分。振捣时间随拌合物坍落度、振捣部位等不同，宜在10~30s内选用。

为保证陶粒混凝土的表面质量，在振动成型后，应进行抹面处理。振捣后，由于上部砂浆的阻挡作用，下层的陶粒不会浮上来，只有面层的陶粒容易产生露面现象。此时可用木拍及时将浮在表层的陶粒压入混凝土中。若颗粒上浮面积较大，可采用表面振动器复振，使砂浆返上，再进行抹面。

7.4 陶粒混凝土的养护

陶粒混凝土一般采用自然养护。由于陶粒的吸水特性，随着混凝土表面水分的蒸发，陶粒吸收的水分不会不断向水泥浆迁移。因此，在一段时间内能够自动供给水泥水化用水，这段时间的长短，视周围气候而定。在温暖和潮湿的气候下，陶粒中的水可以保证水泥的水化，因此可不必覆

盖和喷水养护。但在炎热干燥的气候下，有必要进行覆盖和喷水，防止混凝土表面失水太快产生收缩干裂。

7.5、陶粒混凝土的拆模

混凝土结构浇筑后，达到一定强度方可拆模。模板拆除时间应按结构特点和混凝土所达到的强度来确定。过早的拆除模板，混凝土的强度过低，不能承受构件自重及施工荷载，容易产生裂缝。同时过早拆除还会加大混凝土的徐变量，以梁、板为例，过早拆除模板后，在自重和施工荷载等作用下，混凝土受压徐变量增加，将造成结构较大挠度。过早拆模危害大，所以拆模时间应严格按照规定确定。

8、效果评价

经试验并模拟应用成功后，该项目在之后的陶粒混凝土泵送施工中，都能顺利完成，保证了混凝土和易性，圆满地按设计方要求完成了施工浇筑。如今，该项目的首层地面及屋面都已经全部浇筑完毕，并完成验收。完成后的首层地面见图10。



图10 完成后的尚东首层地面

参考文献:

- [1]《轻骨料混凝土结构技术规程 JGJ 12—2006》，中国建筑工业出版社，2006年
- [2]《轻集料混凝土技术规程》(JGJ51—2002) 中国建筑工业出版社，2002年
- [3]高育欣 王军 陈景 徐芬莲《泵送轻骨料混凝土的配制及应用》施工技术.2011年
- [4][胡曙光 王发洲 轻集料混凝土[M]北京:化学工业出版社 2006年
- [5]《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080—2002)，2002年

作者简介：吴险峰，男，浙江东阳人，高级工程师，硕士，中天建设集团副总裁；吴少平，男，湖南衡阳人，高级工程师，本科，中天七建副工程师；邓志峰，男，广东河源人，工程师，彭建良，男，江西九江，工程师，一级建造师。彭赛、男、湖南益阳工程师